



BK2401/BK2421 Application Notes

BK2401/BK2421 应用手册

V2.0

Beken Corporation
博通集成电路(上海)有限公司
中国上海张江高科技园区
科苑路 1278 号 3A
电话: (86)21 5108 6811
传真: (86)21 6087 1277

文档含博通(BEKEN)公司保密信息, 非经书面许可, 不可外传



更改记录

版本号	日期	作者	注释
1.0	2010 年 01 月 18 日	BEKEN	正式发布
2.0	2010 年 04 月 26 日	BEKEN	根据 Datasheet 升级最新寄存器；增加不同状态下的外围电压值；增加裸 die 绑定注意事项；增加功率控制值；增加用 BK24x1 发送 PN9 序列作为信号源。

目录

1.	本文档主要内容	5
2.	BK2401/BK2421 与 NRF24L01 有何区别?	6
3.	如何判断芯片是否正常工作	9
3.1.	各种状态下芯片外围接口电压	10
3.2.	发射故障分析流程图	11
3.3.	接收故障分析流程图	12
4.	BK2401/BK2421 MODULE 射频测试.....	13
4.1.	测试准备	13
4.2.	发射功率频率测试	14
4.2.1.	发射功率频率测试框图	14
4.2.2.	发射功率频率测试步骤	14
4.3.	接收灵敏度测试	15
4.3.1.	接收灵敏度测试方法	15
4.3.2.	接收灵敏度测试步骤	16
5.	如何过 FCC 和 CE 标准	17
5.1.	传导杂散测试结果	17
5.2.	辐射杂散测试结果	19
5.3.	FCC 测试前 CHECKLIST.....	20
6.	如何躲避干扰	22
6.1.	频点搜索	22
6.2.	干扰检测	22
7.	其它常见问题	23
7.1.	硬件参考文档[2]中各子目录的内容是什么? 其中文件用什么软件打开?	23
7.2.	软件参考文档[3]中对应源码用什么软件打开?	23
7.3.	如何设计 BK2421 的天线? 按照参考文档中设计, 是否需要重新调试?	23
7.4.	用 BK2421 的裸 DIE 直接邦定(BONDING)在 PCB 上需要注意什么?	24
7.5.	用 BK2421 的裸 DIE 邦定在 PCB 上, 怎么判断邦定线有没邦定正确?	24
7.6.	怎样使 POWER DOWN 模式下电流消耗最低?	25
7.7.	怎样控制输出功率?	25
7.8.	怎样使接收灵敏度变得更差, 以便控制在较短距离内通信?	25
7.9.	如何操作 FEATURE 寄存器 BANK0_REG29 和 BANK0_REG7[7]=RBANK?	25
7.10.	多次连续插拔电源, 为什么有时会通讯失败?	25
7.11.	为什么我设置的自动重发次数 ARC 为非 0, 系统却没有自动重发?	25
7.12.	EN_DPL 和 EN_AA 各工作状态下的区别?	26
7.13.	怎样将 MAX_RT 状态位清零?	26
8.	参考文档.....	27

图表

图表 1 BK2401/BK2421 与 NRF24L01 必须考虑的差异点	7
图表 2 BK2401/BK2421 与 NRF24L01 通常不需考虑的差异点	8
图表 3 各种状态下芯片外围接口电压	10
图表 4 发射故障分析流程图	11
图表 5 接收故障分析流程图	12
图表 6 传导测试图片	13
图表 7 发射功率频率测试框图	14
图表 8 接收灵敏度测试框图	15
图表 9 传导杂散测试结果	18
图表 10 FCC 辐射测试图片	19
图表 11 辐射杂散测试结果	20
图表 12 BK2401/BK2421 PIN 上 ESD 结构	24
图表 13 输出功率控制表	25
图表 14 EN_DPL 和 EN_AA 不同工作状态	26

1. 本文档主要内容

本文档描述了使用 BK2401/BK2421 芯片当中经常碰到的问题，由于 BK2401 和 BK2421 的唯一区别是：**BK2401 只支持 1Mbps 空中数据速率，而 BK2421 支持 1Mbps 和 2Mbps 空中数据速率**，而其它方面都一样，所以本文档中如无特殊说明，一般提到 BK2421 的性能、功能以及各种操作、应用，都同样适用于 BK2401。

CONFIDENTIAL

2. BK2401/BK2421 与 nRF24L01 有何区别？

BK2401 和 BK2421 的唯一区别是：BK2401 只支持 1Mbps 空中数据速率，而 BK2421 支持 1Mbps 和 2Mbps 空中数据速率。

BK2401/BK2421 与 nRF24L01 高度兼容，两者最大的区别是前者有两个 BANK 寄存器 (Bank0, Bank1)，而 nRF24L01 只有一个，所以 BK2401/BK2421 需要上电初始化 Bank1。以下部分包括设计时必须考虑的差异点和一般情况下不需考虑的差异点。

2.1 设计时必须考虑的差异点：

序号	设计时必须考虑的差异点	nRF24L01	BK2401/BK2421	备注
1	射频前端匹配电路	匹配电路结构相同，元器件值不同。	匹配电路结构相同，元器件值不同。具体设计见[2]。	
2	Bank 寄存器数	1 个	2 个 (Bank0,Bank1)	Bank1 是测试和功能扩展寄存器。
3	上电初始化	无	<p>需要初始化 Bank1，具体步骤如下：</p> <p>(1) 读当前 Bank 状态 Bank0_REG7[7] = RBANK = (0:Bank0;1:Bank1)，如果为 Bank0，则用 SPI Bank 切换命令 ACTIVATE +0x53 切换到 Bank1;如果为 Bank1,则转到(2)。</p> <p>(2) 初始化 Bank1 寄存器，寄存器值如下：</p> <p>0xE2014B40, //REG0 0x00004BC0, //REG1 0x028CFCD0, //REG2 0x41390099, //REG3 0x0B869ED9, //REG4 0xA67F0624, //REG5 ----- 0x00127300, //REG12 0x36B48000, //REG13 0x412008048120CFF7FEFFFF, //REG14</p>	注意 Bank1 写入顺序。

			<p>注意：</p> <p>Bank1 的 REG0 到 REG8 写入顺序为：先高字节，再低字节；每个字节从高位再到低位，具体见[3]。</p> <p>Bank1 的 REG9 到 REG14 及 Bank0 的读写顺序和 nRF24L01 一致：先低字节，再高字节；每个字节仍然从高位到低位。</p> <p>(3) 用 SPI Bank 切换命令 ACTIVATE +0x53 切换到 Bank0。</p>	
4	地址选择	地址字节为 3~5bytes，如不满 5bytes 不需要填满 5 个 bytes。	地址字节为 3~5bytes，如不满 5bytes，需要在不用的高字节填任意地址，以便填满 5 个 bytes。	

图表 1 BK2401/BK2421 与 nRF24L01 必须考虑的差异点

2.2 设计时通常不需考虑的差异点：

序号	设计时通常不需考虑的差异点	nRF24L01	BK2401/BK2421	备注
1	CSN 时序要求	CSN 在写完数据拉高时不需要迟于 CLK 操作。	CSN 在低状态下写数据以后，再拉高必须迟于 CLK 至少半个 CLK 的时间，且 CSN 上升时间不能大于 100ns。	
2	CE 置低后，RX_DR 中断清零	CE 置低以后中断不会清零。	当 CE 置低后，RX_DR 中断会自动清零，所以要在 CE 置低之前先处理中断。	
3	PTX、PRX 中断触发时间	当 PRX 发送带 PAYLOAD 的 ACK 时的 PRX 端 ：TX_DS 比 RX_DR 延迟一个数据包置 1； PTX 端 ：RX_DR 和 TX_DS 同时置 1。	当 PRX 发送带 PAYLOAD 的 ACK 时的 PRX 端 ：RX_DR 和 TX_DS 同时置 1； PTX 端 ：TX_DS 先置 1；RX_DR 比 TX_DS 延迟 2-3us 置 1。	如果 ACK 带 PAYLOAD 时需要注意。

4	PTX 设备对接收 FIFO 的溢出处理	如果 RX 的三级 FIFO 已经收满，则收到的包不会覆盖 FIFO 中的数据，会触发 RX_DR 中断。	如果 RX 的三级 FIFO 已经收满，则收到的包不会覆盖 FIFO 中的数据，并且 不会触发 RX_DR 中断 。	如果 ACK 带 PAYLOAD 时需要注意。
5	CD 检测	没有控制开关，不能设定阈值，而且阈值会随温度变化 ±5dB，隔一段时间 CD 会自动清零。	有控制开关，有比较阈值，Bank1_REG5[29:26]为比较阈值，0: -97dBm，15: -67dBm，步长 2dB。当检测到连续 128us 干扰信号大于所设阈值时，Bank0_REG9[0]会置 1，且会一直保持为 1，直到读 CD 值以后会自动清零。如不用 CD，请关闭 CD 以省电（1mA 左右，默认初始值为关闭）。	BK2421 提高 RSSI 检测精度。
6	REUSE_TX_PL 命令使用	当更换 channel，或者 CE 拉低，或者切换 TX/RX 模式后， REUSE 命令仍然有效。	当更换 channel，或者 CE 拉低，或者切换 TX/RX 模式后，该命令会自动结束。 如果需要再次启动 REUSE，则需要重新发送该命令。	如果用到 REUSE 命令时需注意。
7	Bank0_REG6[4]=RF_PWR	PLL_LOCK，强行让 nRF24L01 闭环发射，发射载波步骤复杂。	不用此 bit，发射单载波在 Bank1 中控制，Bank1_REG4=0xD99E8621	发射单载波简单，只需 Bank1 中写一个寄存器即可。
8	发射功率	最大 0dBm，四级控制。	可八级控制输出功率，最大 5dBm，最小为 -40dBm，具体功率等级见后面“其它常见问题”。	可提供更多的发射功率选择。

图表 2 BK2401/BK2421 与 nRF24L01 通常不需考虑的差异点

3. 如何判断芯片是否正常工作

如果碰到一对芯片不能正常收发，首先应该通过与正常芯片收发来判定哪个芯片出了问题，并判定是发射不好还是接收不好，在此前提下，将详细介绍在发射或接收出了问题以后的故障分析流程。

各种状态下电压值表及收发故障流程分析图见后面，下面部分是图表中注释项目的详细解释说明。

在参照流程图调试时，如出现死循环，考虑芯片损坏或焊接不良。

- (1) **检查软件：**是否与参考代码特别是参考寄存器值有差异；用正常的板子来检查 MCU 是否正确地写了所有的寄存器；BK2421 在收发的时候，是否切换到了正确的模式，在发包前，是否有延时；为了方便调试，建议先发送 NoACK 包，然后用 REUSE 命令不停的发送包。参考代码详见参考文档[3]。
- (2) **检查射频匹配电路和天线：**电路和天线是否与参考电路完全相同，包括器件值，PCB 版图和天线尺寸。如果电路不同需要传导测试输出功率，测试方法见[发射功率频率测试](#)，如没达到 0dBm 则需调试电路匹配值，如果天线不同需用矢量网络分析仪测试天线特性或用替换法排除天线影响。注意元器件值焊的时候是否短路，芯片 PIN 脚 VDDPA,RFP,RFN 是否短到地了。
- (3) **ISM 频段有没干扰：**测试 ISM 频段(2400MHz~2483.5MHz)有没干扰的最直接方法是将 2.4G 天线连接到频谱仪，直接测空间辐射的信号，设置频谱仪 Span=2300MHz~2500MHz，Ref Amplitude<-50dBm。如果没有频谱仪，最简单的方法是切换信道重新测试，此时可选稍微超出 ISM 频段，但 BK2421 仍能正常工作的频率，如 Channel=90(2490MHz)。
- (4) **发射单载波 CW (Continuous Wave)：**测试方法见[发射功率频率测试](#)。
- (5) **CW 频偏<100KHz：**CW 频偏值指测量值频率与理论值频率之间的偏差，理论值指信道 N 时的频率为(2400+N)MHz，测试频率时 Span<10MHz。
- (6) **调晶体频偏或换晶体：**首先根据晶体负载电容 CL 计算晶体上电容的值 $C1=C2=2 \times CL - C_p$ ， C_p 为芯片和 PCB 上的寄生电容，BK2421 为 2~3pF；如果按照理论值频偏还是大于 100KHz 的话，那需要改变 C1,C2 的值（变大 C1,C2 值发射频率都会变低，但 C1 是精调，C2 是粗调）；如果调完以后的值一致性很差，则需要更换晶体，提高晶体精度 ppm。
- (7) **电源是否干净：**如果单载波在频谱上比较脏，则很有可能是电源干扰引起的，可用示波器直接测电源+3.3V，示波器设置为 AC Coupled，如果电源噪声峰峰值 Vpp 大于 20mV，说明电源太脏了，需要用 RC 滤波电路，串联 10 欧姆，并联大电容到地，详见参考原理图。如果电源不容易滤干净，可用外部干净电源代替输入看能否正常工作。
- (8) **SPI 读写正常与否的判断：**先写 Bank0 中能 R/W 的寄存器，然后再读出来，如果写入和读出一样说明 SPI 读写正常，如果不一样，可按照以下步骤检查：
 - 1) 用示波器看寄存器读写波形：检查 SPI 四根线的电平是否正确，波形是否和参考代码的理论波形一样；
 - 2) 函数 SPI_RW 和初始化数组在有些 MCU 平台上编译后，会有异常。单步跟踪看看代码是否和理论的一样；
 - 3) MISO 应配置成输入模式，有的 MCU 在 MISO 上需要加上拉电阻，可用示波器看电平是否达到 MCU 输入要求；
 - 4) 检查 MCU 的 SPI 初始化配置。
- (9) **CW 锁定：**判断 CW 是否锁定需要使用频谱仪观察，设置频谱仪 Span<1MHz,频率为期望的频率，如果此单一频率一直停留在某一频点而不会跳动就说明锁定住了。
- (10) **检查晶体是否正常工作：**由于在默认设置状态下，晶体上电 20ms 以后会自动关掉，所以要测试晶体是否正常工作需要重新上电，在上电的 20ms 以内在晶体 PIN 脚 XTALP 或 XTALN 测试，如果有信号说明晶体振荡正常，否则可能晶体损坏。

- (11) **灵敏度测试:** 灵敏度测试详见[接收灵敏度测试](#)，如果没有矢量信号发生器，则用收发误包率代替，或只关注发射功率大小也能间接地衡量接收性能。
- (12) **查看接收本振频偏<100KHz:** 接收本振(RX LO)频偏值指测量值频率与理论值频率之间的偏差，此处查看接收本振的目的等同于(5)，是为了看芯片是否频偏太大，所以也可使此芯片工作在发射状态用(5)判断。如用接收方式就需要查看接收本振，具体详见[接收灵敏度测试步骤](#)中的第(3)步，理论的接收本振频率为：

$$Fr_{xlo} = (2400 + N - F_{space}) * 16 / 15 \text{MHz};$$
其中 N 为信道号， $F_{space} = 1\text{MHz}(1\text{Mbps})$ 或 $2\text{MHz}(2\text{Mbps})$ 。
- (13) **接收本振锁定:** 判断接收本振是否锁定需要使用频谱仪观察，设置频谱仪 $\text{Span} < 1\text{MHz}$, $\text{Ref Amplitude} = -50\text{dBm}$ ，频率为(12)中计算的频率，如果此单一频率一直停留在某一频点而不会跳动就说明锁定住了。

3.1. 各种状态下芯片外围接口电压

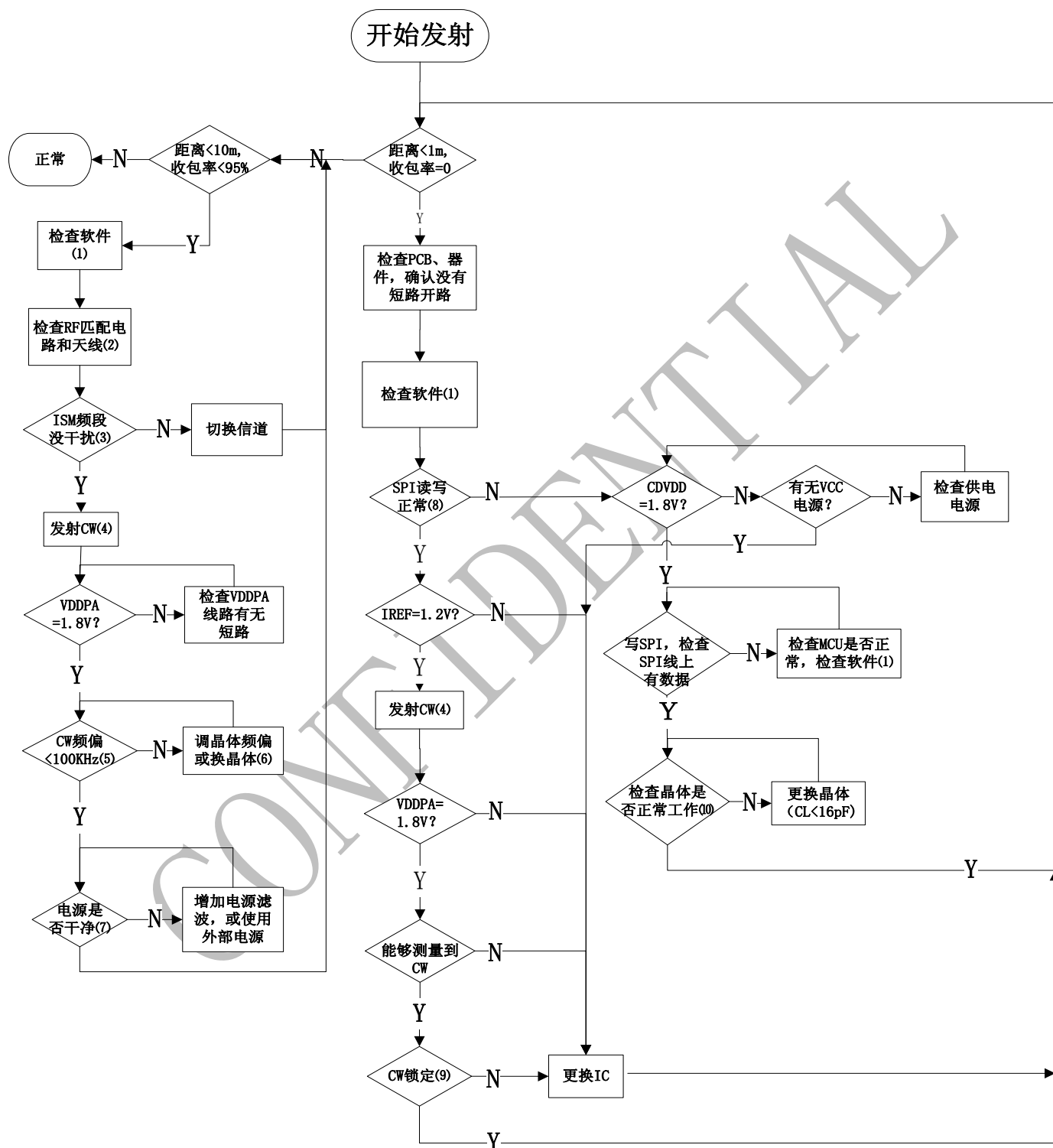
芯片在不同的工作状态下，外围接口电压具体值如下表，表中为近似值，不同芯片及不同外围供电和器件值会有所差异：

	CDVDD	IREF	VDDPA	XTALP	XTALN
Default*	1.8V*	0V*	0V*	0V*	0V*
Power Down	1.8V	0V	0V	0V	0V
StandByI	1.8V	0V	0V	直流 0.7V, Vpp 为 0.6V	直流 0.7V, Vpp 为 0.5V
StandByII	1.8V	0V	0V	直流 0.7V, Vpp 为 0.6V	直流 0.7V, Vpp 为 0.5V
Receive	1.8V	1.2V	0V	直流 0.7V, Vpp 为 0.6V	直流 0.7V, Vpp 为 0.5V
Transmit	1.8V	1.2	1.8V	直流 0.7V, Vpp 为 0.6V	直流 0.7V, Vpp 为 0.5V

图表 3 各种状态下芯片外围接口电压

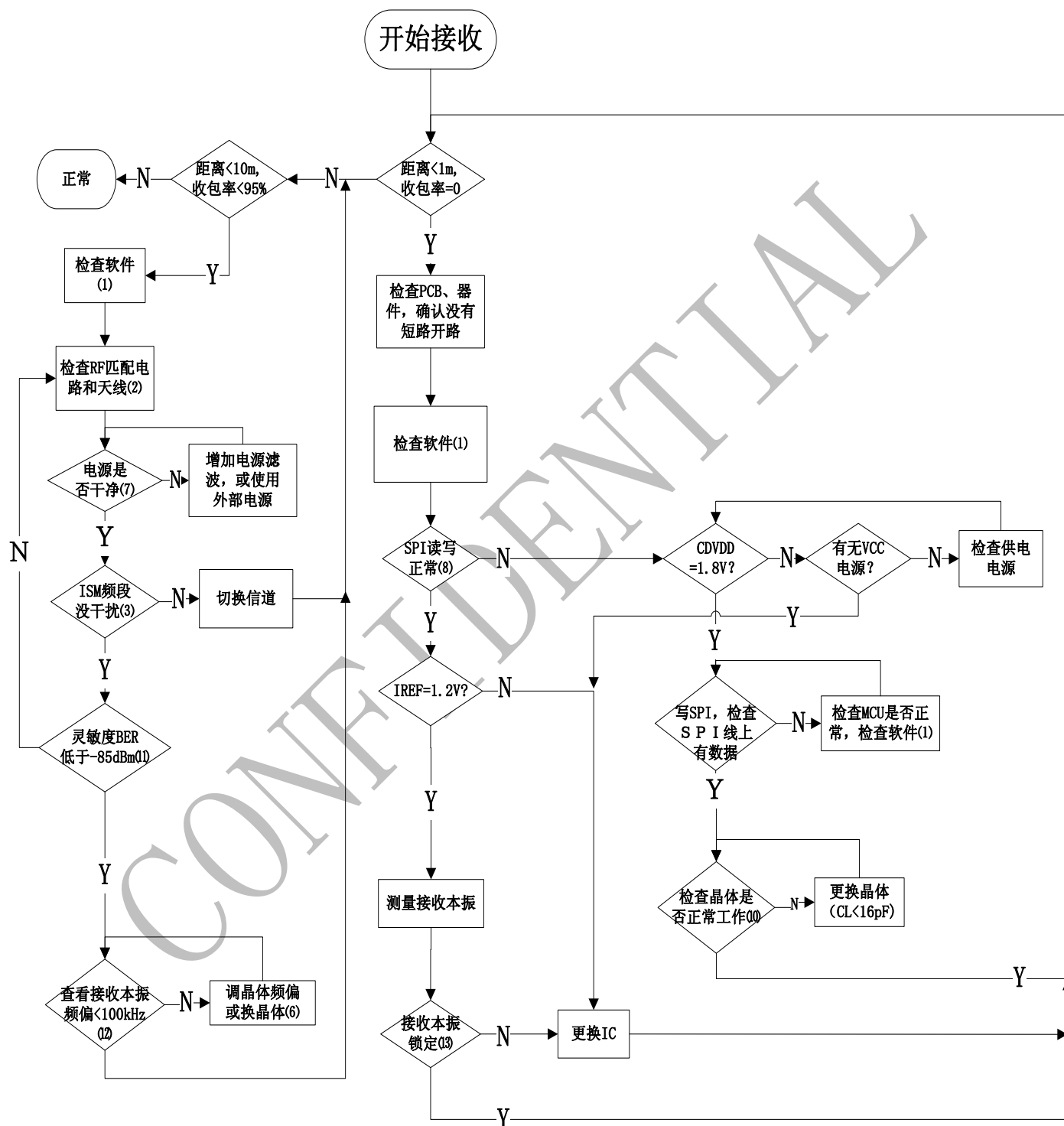
*默认(Default)状态是指：芯片只加电源，SPI 不对其操作，所以此状态的值可以用来判断芯片是否损坏或焊接好坏。此状态下芯片上电最初的 20ms 会自动初始化，所以最初的 20ms PIN 脚电压如下：IREF 会有 20ms 的 1.2V 电压，然后变为 0V；VDDPA 在最后 5ms 左右会有 1.8V 电压，然后也变为 0V；XTALP, XTALN 在 20ms 中都会有电压，然后变为 0V，所以如果最初 20ms 内上面 PIN 脚没有上述电压变化，则说明芯片损坏或焊接不良。

3.2. 发射故障分析流程图



图表 4 发射故障分析流程图

3.3. 接收故障分析流程图



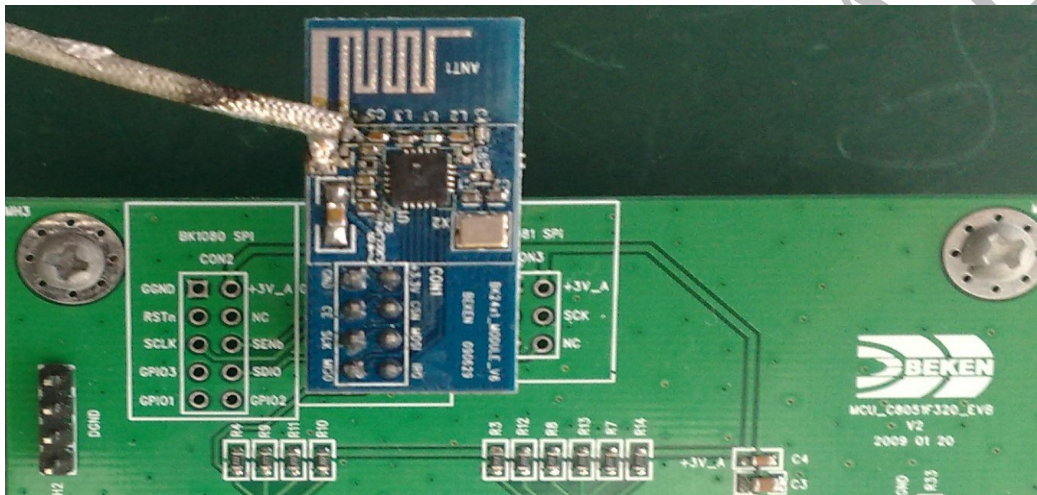
图表 5 接收故障分析流程图

4. BK2401/BK2421 Module 射频测试

BK2401/BK2421 Module 的射频性能测试主要包括发射功率（Power）频率（Frequency）和接收灵敏度（Sensitivity）测试，而 FCC/CE 测试主要 FAIL 在谐波功率高于标准要求，本部分将详细介绍测试方法和模块测试结果。

4.1. 测试准备

一般实验室射频测试都为传导(Conducted)测试，即通过射频线 SMA 头连到外部仪器测试，对于本 Module 需要直接从匹配电路的 C5、C6 之间的 pad 焊出射频线，并且与 PIFA 天线断开(去掉 L4)，射频线的外壳地需要就近接 Module 地，下图为传导测试的焊接图片：



图表 6 传导测试图片

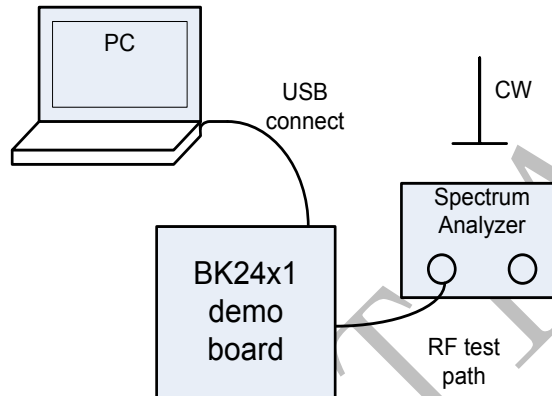
射频测试需要准备以下仪器：

- ◆ 射频测试线：需要专门的射频线进行测试，并且需要知道测试频率下的插入损耗（IL）。
- ◆ 频谱分析仪（用于测发射性能）：测 2.4G 载波信号，最高频率至少 3GHz，要测试五次谐波，最高频率至少 13GHz，具体仪器型号如 Agilent PSA、ESA 系列频谱分析仪。
- ◆ 矢量信号发生器（用于测接收性能）：最高频率至少 3GHz，要有 Custom (I/Q) setup modulation option，具体仪器型号如 Agilent E4438C。

4.2. 发射功率频率测试

4.2.1. 发射功率频率测试框图

BK2401/BK2421 的 DEMO 板通过 USB 与主机相连，频谱分析仪通过射频线与 DEMO 板的 SMA 口相连。



图表 7 发射功率频率测试框图

4.2.2. 发射功率频率测试步骤

发射功率测试需要 BK24x1 输出单载波信号，寄存器设置详见参考文档 [3] 的 Carrier_Test() 函数或直接用参考文档[4]的 Demo 软件直接发单载波；

如下为具体步骤：

- (1) 设置芯片处于发射状态：写 Bank0_REG0_Bit0=0；拉高 CE=1，使 CE 产生上升沿；
- (2) 设置测试的信道及频率：写 Bank0_REG5[6:0]=0x28=40, 对应频率 Frf= (2400+40) MHz；
- (3) 设置芯片处于单载波发射：写 Bank1_REG4=0XD99E8621；如使用 Demo 软件切换到 “ACK/NoACK Mode Test” 界面，点 Carrier Test—Start 按钮即可输出单载波；
- (4) 频谱分析仪设置：
 - ◆ Frequency center=Frequency at Max Amplitude, such as 2440MHz at channel 40；
 - ◆ Span<10MHz；
 - ◆ RBW<100kHz，可以设为 Auto；
- (5) 记录该频率下的功率值和对应频率值，频率值需要分辨到 1KHz，通过更改 2) 中 channel 值测试低、中、高信道的功率值，其中发射频率 Frf=(2400+channel)MHz。

4.3. 接收灵敏度测试

4.3.1. 接收灵敏度测试方法

接收灵敏度(Sensitivity)是指当接收误比特率(BER: Bit Error Rate)为 0.1%时的输入信号强度。Sensitivity 可以通过以下三种方法计算:

(1) 通过 PER 得到 BER:

BER 可以根据误包率(PER: Packet Error Rate)来计算, 以下为计算公式,

$$PER=1-(0.999^N)$$

其中 N 为每个包的总 bits 数, 该 PER 值即对应 0.1% BER。

此测试方法中不应该使用 ACK 和重传, 由于用此方法结果很不精确, 所以发的包应该尽可能多 (如 10000 个包)。

(2) 软件统计错误 Bits 数得到 BER:

发射机连续发射包到接收端, 接收 RX 芯片初始配置为:No-Ack, 10bit preamble, 3bytes 地址域, 32bytes 包长度, No CRC。

RX 读取收到的包后, 与实际已知的包比较, 计算出错误 bits 数目, 从而计算出 BER。为了测试准确, 建议发送的 bits 数至少为 1000 个。

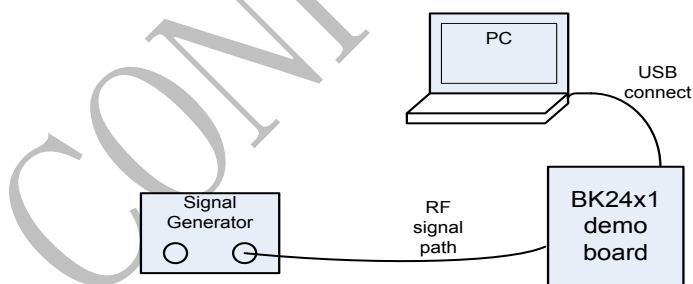
该种测试方法相对复杂些, 但是结果较为精确。

(3) 硬件统计错误 bits 数得到 BER:

BK2401/BK2421 芯片硬件本身支持比特流的统计, 可以直接算得 BER, 该方法最为准确, 但是需要用专门的信号发生器产生 PN9 信号, 同时需要软件编程, 让芯片进入 BER 测试模式。

这里介绍 BK2401/BK2421 芯片特有的硬件计算 BER 方法, 接收灵敏度测试框图如下:

BK2401/BK2421 的 DEMO 板通过 USB 与主机相连, 信号源通过射频线与 DEMO 板的 SMA 口相连。



图表 8 接收灵敏度测试框图

4.3.2. 接收灵敏度测试步骤

- (1) 设置芯片处于接收状态: 写 Bank0_REG0_Bit0=1; 拉高 CE=1, 使 CE 产生上升沿;
- (2) 设置芯片工作于 1Mbps 或者 2Mbps 速率: Bank0_REG6_Bit3=0/1; (注意 BK2401 支持 1Mbps, BK2421 支持 1Mbps 和 2Mbps);
- (3) 工作频率计算:
由于频率偏差会影响到灵敏度测试, 所以工作频率 Frf 需根据实际接收 RX LO 泄漏的频率 Frxlo 来计算, Frxlo 的频率需要用频谱分析仪测试, 测试框图同[发射功率测试框图](#), 在芯片接收模式下, 在频谱仪频率范围 2550~2650MHz 之间会有接收 LO 的单载波信号。
设置频谱分析仪 Span<1MHz, Ref Amplitude=-50dBm, 读出 Frxlo 的准确频率值, 分辨率到 1KHz, 然后根据以下公式计算出 Frf 的值输入到信号源频率设置中:

$$\begin{aligned} \text{1Mbps Mode:} & \quad \text{Frf} = \text{Frxlo} * 15/16 + 1\text{MHz} \\ \text{2Mbps Mode:} & \quad \text{Frf} = \text{Frxlo} * 15/16 + 2\text{MHz} \end{aligned}$$

- (4) 把 Module 重新连到[接收灵敏度测试框图](#), 设置矢量信号发生器 E4438C*如下:
 - ◆ Input Frequency: Frf((3)中计算的输入射频频率)
 - ◆ Data : PN9
 - ◆ Filter : Gaussian
 - ◆ Filter Bbt : 1
 - ◆ Symbol Rate : 1Msps or 2Msps
 - ◆ Modulation Type : 2-Lvl FSK
 - ◆ Freq Dev : 300kHz for 1Msps
600kHz for 2Msps
- (5) 切换 Demo 软件到 “ACK/NoACK Mode Test” 界面, 点误码率 BER Test—Start 按钮, 再按 Read 按钮, 调整信号发生器的输出功率, 直到 BER 的值为 0.001, 信号发生器的功率值即为灵敏度值, 记得需要减掉射频线的插损。

如果不用 Demo 软件, 通过自己软件控制, 详见参考文档 [3] 中的 BER_Test () 函数, 该函数读取一段时间内芯片收到的总 bit 数和错误 bit 数, 用户可以很方便的计算出 BER。
- (6) 通过更改 channel 值换工作频率, 重复(4)、(5)、(6)测低、中、高信道下的接收灵敏度。

矢量信号发生器 E4438C*: 如没有类似 E4438C 的仪器, 可用另一个 BK2421 作为替代信号源来发送 PN9 序列, 设置寄存器如下: Bank1_REG1=0x00004B0C; Bank1_REG2=0x028CFCA0; Bank1_REG12=0x10127300, 然后转到步骤(5)、(6)测接收信号。

但是此情况下只能定性地判断接收芯片的性能: 因为用 BK2421 作为信号源, 接收芯片的最好 BER(即发射大信号)只能到 2% 左右, 而且最小 BER(即通过衰减器发射小信号)对应的接收灵敏度也只能到 -80dBm 左右。用户可以根据此方法定性地测量接收性能, 通过与正常芯片的测试结果比较也能相对定量地判断芯片的接收性能。

5. 如何过 FCC 和 CE 标准

由于 FCC 标准比 CE 标准要求严格，所以此部分以 FCC 为例说明，FCC 关于 2.4G ISM 频段的规范主要参考 FCC section 15.247 和 15.249，ISM 工作频段为 2400MHz~2483.5MHz。

在 FCC 标准中，最容易 FAIL 的指标是发射杂散特别是高次谐波的幅度容易超过标准范围，要过 FCC 标准最关键的是传导（连线）测试结果与 FCC 标准相比需要有足够的余量（至少 5dB），如果由于测试条件所限，至少需要满足以下几点：

- ◆ 射频匹配电路部分的原理图和版图完全等同于本文档中匹配电路的布局和布线，如果不同则需要重新调试元器件值；
- ◆ 发射功率最大为 0dBm: Bank0_REG6[2:1]=2;
- ◆ 发射测试模式下,需要关掉接收,否则 RX 本振泄漏会超过标准: Bank0_REG0[0]=0;

由于各个客户所使用的板材和元器件都不一样，所以正确的方法是在以上几点满足的情况下，调试传导测试结果与 FCC 标准相比有足够余量，并且在量产时用相同的元器件焊接（同品牌同值）。

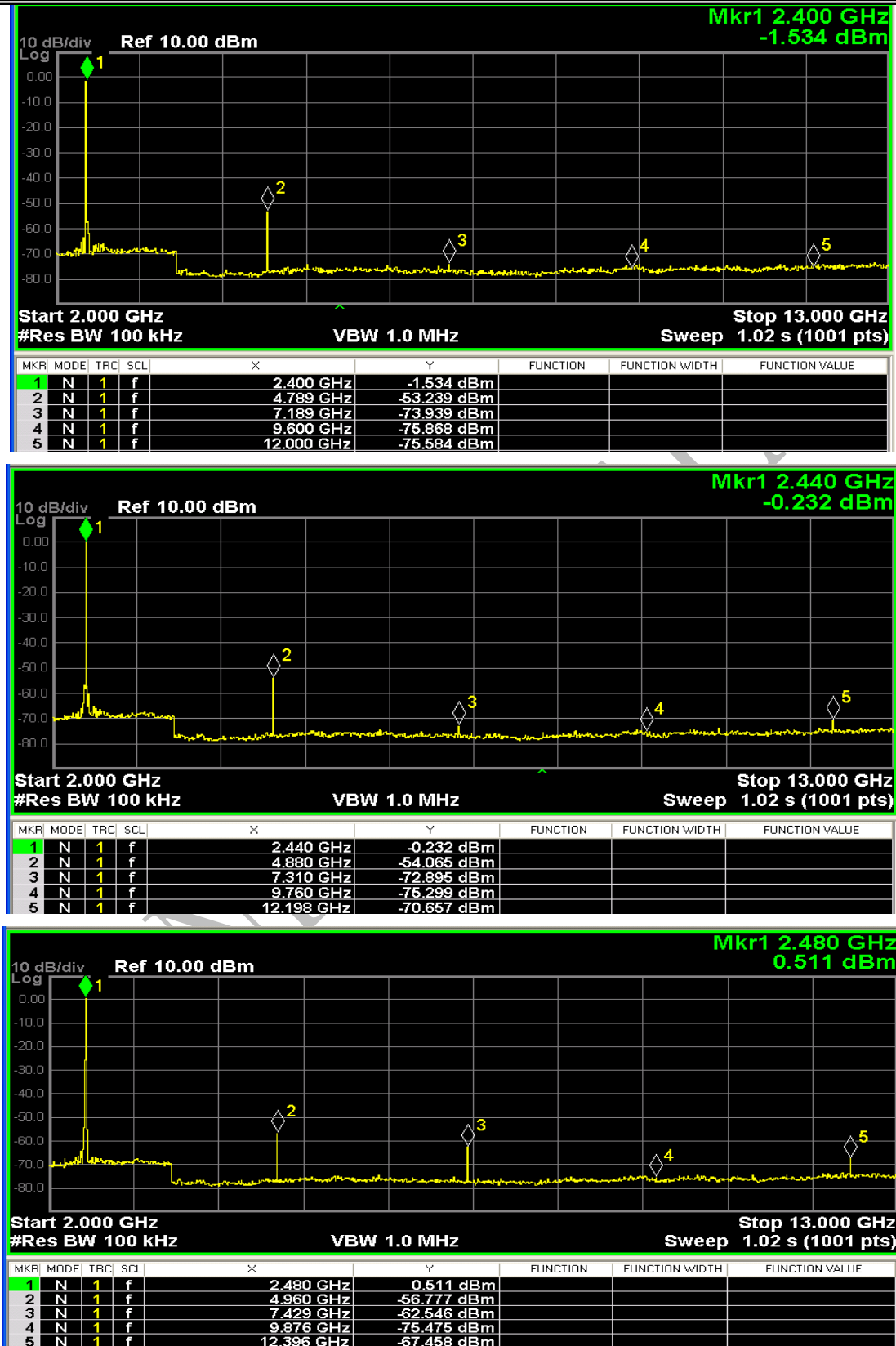
射频匹配电路部分的原理图和版图详见参考文档[2]。

5.1. 传导杂散测试结果

传导杂散测试需要焊接带 SMA 头的射频线到频谱分析仪来测试发射功率，具体请参考前面的[测试准备](#)和[发射功率频率测试](#)。

测试之前需要校准各个频率的线损，以下是低、中、高信道下的传导杂散测试结果示例：

载波频率 (MHz)	谐波频率 (MHz)	FCC 要求:<-41.2dBm		CE 要求: <-30dBm	
		实测(dBm)	余量(dB)	实测(dBm)	余量(dB)
2400(低信道)	4800	-53	12	-53	23
	7200	-73	32	-73	43
	9600	-75	34	-75	45
	12000	-75	34	-75	45
2440(中信道)	4880	-54	13	-54	24
	7320	-72	31	-72	42
	9760	-75	34	-75	45
	12200	-70	29	-70	40
2480(高信道)	4960	-56	15	-56	26
	7440	-62	21	-62	32
	9920	-75	34	-75	45
	12400	-67	26	-67	37

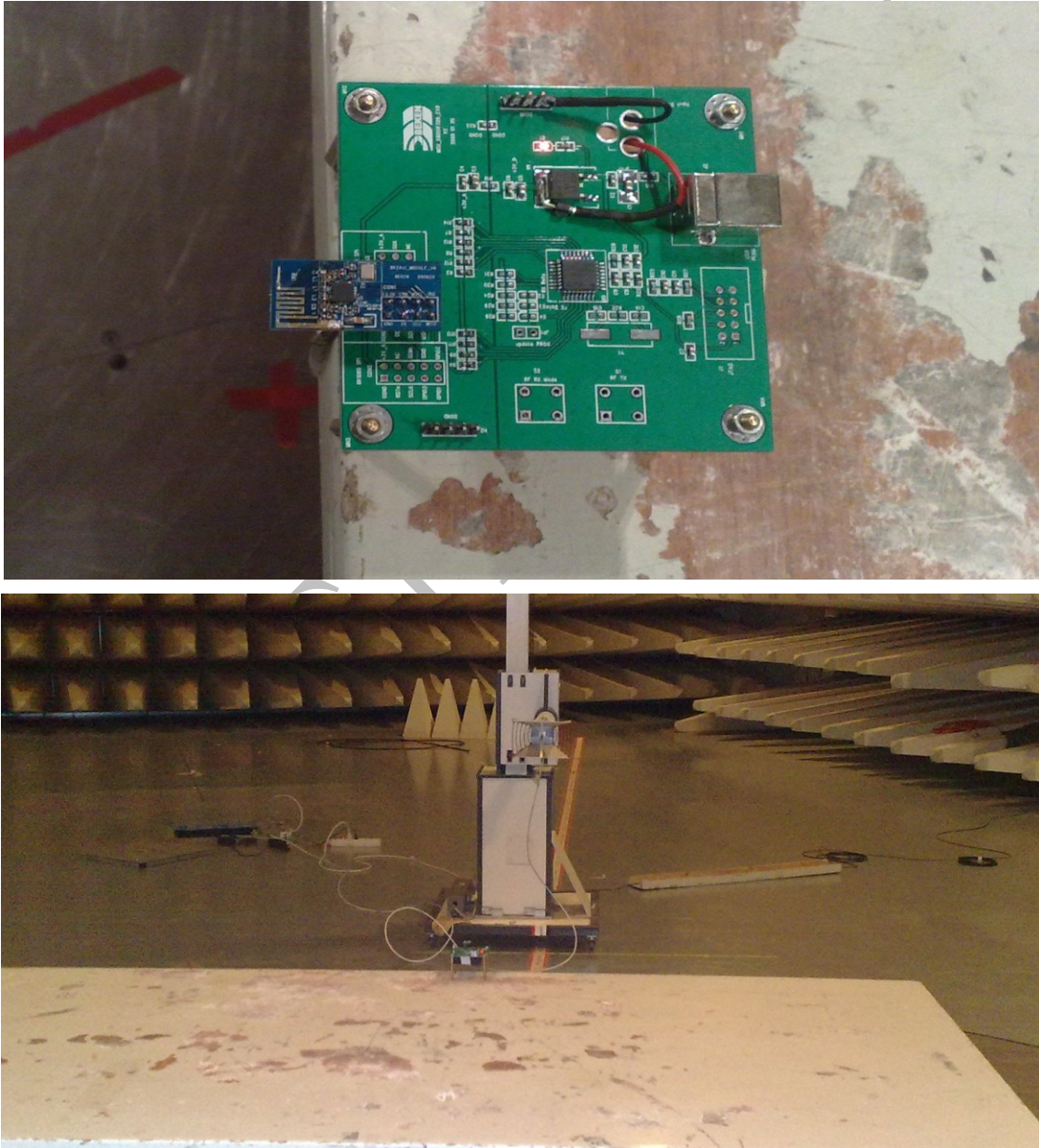


图表 9 传导杂散测试结果

5.2. 辐射杂散测试结果

由于 BK2401/BK2421 的天线为 PCB 板上天线，所以一般 FCC 测试都为辐射情况下（空间辐射 3 米，见下图）的测试，而天线增益已经考虑在内，所以不需要另外关于天线的说明。

由于谐波中辐射最强的为二次和三次谐波，所以本示例辐射杂散测试中主要的测试内容为二、三次谐波的辐射强度。



图表 10 FCC 辐射测试图片

FCC 测试中对于功率信号有两种检测方式：Peak Detector（峰值检测）和 Average Detector（平均值检测），Average 为实际工作情况下的平均信号辐射功率，如无线鼠标中假设每 8ms 发送一次信号，则此值即为在 8ms 内发送的功率在 8ms 时间内的平均值，而 Peak 为发射 burst 功率的最大值，以上值在测试中都会在全方向不同高度下 MAX Hold 取最大值。

通常在测试标准中要求 Peak 功率值大于 Average 功率值为 20dB，而实际产品当中 Peak 功率值大于 Average 功率值为：

$$P_{\text{increase}} = 20 * \log((T_{\text{on}} + T_{\text{off}}) / T_{\text{on}})$$

T_{on} 为功率发射时间， T_{off} 为发射中间间隔

所以在 FCC 测试中，需要用实际产品在正常发射模式下发数据作为测试模式进行测试，而不是发单载波作为 Peak 和 Average 的测试模式；由于正常发射下，发射 PA 会 ON/OFF 导致发射频谱变宽，所以在低、中、高信道频率选择上不要太靠近 ISM 频段边缘频率，即低信道选择大于 2402MHz，而高信道小于 2480MHz，以防止在 ISM 频段以外有泄漏边带超过标准。

由于 Average 值跟实际产品有关，所以下面示例中的测试结果为单载波发射下的值，即对应于 Peak 标准下的值，从结果可以看出即便是 BK2401/BK2421 Module 发射单载波下的功率值在 Average 下都有相当的余量。

载波频率	谐波频率	FCC 要求: <74dBuV/m@3m (Peak Detector) <54dBuV/m@3m (Average Detector)		
(MHz)	(MHz)	实测(dBuV)	Peak Detector 余量(dB)	Average Detector 余量(dB)
2400(低信道)	4800	50	24	4
	7200	40	34	14
2440(中信道)	4880	49	25	5
	7320	39	35	15
2480(高信道)	4960	46	28	8
	7440	38	36	16

图表 11 辐射杂散测试结果

5.3. FCC 测试前 Checklist

当准备去过 FCC 测试之前，请检查产品是否工作在如下模式：

- ◆ 发射功率最大为 0dBm: Bank0_REG6_Bit[2:1]的值小于等于 2;
- ◆ 发射测试模式下,需要关掉接收,否则 RX 本振泄漏会超过标准: Bank0_REG0[0]=0;
- ◆ 产品的测试模式需要正常工作模式下，即发数据的方式以模拟真实情况，而不是只发单载波作为测试模式；
- ◆ FCC 需要测试低、中、高三个信道，产品中需要通过按钮可以直接切换不同信道，信道频率选择建议至少离开 ISM 频率边缘 2MHz 以上；
- ◆ 测试产品需要用本产品供电电源（如电池），而不能用其它产品（如笔记本）作为电源；

如果以上设置已经完成，在自己实验室请先确保传导测试没问题：

- ◆ 如果测试条件允许，传导测试结果与 FCC 标准相比有足够的余量（至少 5dB）；
- ◆ 如没有测试条件，则至少要求射频匹配电路部分的原理图和版图完全等同于本文档匹配电路中的布局和布线，如果不相同则一定要到有条件的实验室进行预测试。

CONFIDENTIAL

6. 如何躲避干扰

由于 BK24x1 工作在 2.4G ISM 频段，这个频段上有很多其它的设备在共用，所以存在着很多干扰信号，大致分为两类：连续干扰(WLAN 信号)和突发干扰 (Bluetooth 信号)。

在大部分时间里，BK24x1 持续地工作在一个没有干扰的频点，但是在设备上电时或检测到干扰后，PTX 和 PRX 需要搜索频点，以找到一个没有干扰的频点来通讯。对于频点搜索和干扰躲避，实现起来比较灵活，用户可以根据实际应用情况，自己定义算法和规则。

6.1. 频点搜索

(1) .NOACK 包传输

常用方法是：PRX 和 PTX 按照预先定义的频点序列，以不同的速度进行频率切换，同时进行数据包收发，由于 PRX 和 PTX 的频率切换速度不同，因此，在某个时刻，某个频点，如果 PRX 收到数据包，同时 PTX 也收到 PRX 发的软件应答包，则说明该频点没有干扰，从而 PRX 和 PTX 停止频率切换，固定在该频点进行通讯。

在搜索频点时，可以用命令 REUSE_TX_PL 来发送数据包，从而加快搜索速度。

在通讯过程中，如果通讯的任何一方在一段时间不能收到数据包或者应答包，则再次进入搜索频点阶段或者休眠状态。

(2) ACK 包传输

对于 ACK 模式传输的包，PTX 可以通过 MAX_RT 或 TX_DS 中断来判断数据包是否发送成功，如果发送失败，PTX 就重传，如果几次重传仍然失败，就切换到下一频点开始发送；PRX 如果一段时间没有接收包，就切换到下一个频点接收。由于 PTX 和 PRX 的频率切换速度不一样，因此，就在某一时刻，如果双方在某频点收发成功，则表示该频点可用。

6.2. 干扰检测

当存在蓝牙突发干扰时，由于蓝牙通常在一个频点的驻留时间小于 625 us，将重发延迟设置为 700us 就可以保证两次发射不会都受干扰。

对于连续的干扰信号比如 WLAN 信号，在 PRX 模式下，用户可以通过 CD 来检测，CD 检测的具体操作方法请看比较表格“CD 检测”项。

但是，在 PTX 模式下，通过 CD 来检测连续干扰，则不是很好的方法。这是因为：

- ◆ 需要切换到 RX 模式检测 CD，会耗费较大的电流，浪费较多的时间。
- ◆ 很多设备在空中传输包的时间大约 100-300us，有可能检测时没有干扰，过几 us 后，又有干扰出现。
- ◆ 蓝牙等跳频设备，可能会干扰 BK2421 的一个包，但 BK24x1 下一次重传却可能成功。
- ◆ 天线的方向性及多路径衰减也会影响 CD 的检测。

7. 其它常见问题

7.1. 硬件参考文档[2]中各子目录的内容是什么？其中文件用什么软件打开？

Nano Dongle 目录（PCB 板厚 0.6mm）：Nano Dongle 的设计原始文档, 参考文档[2]中主要介绍的内容。

Normal Module 目录（PCB 板厚 1.0mm）：基于 Nano Dongle 射频匹配电路设计的 Normal Module 设计文件，包括两种天线（PIFA 和 Wiggle）的设计原始文档。

目录中文件按扩展名请用以下软件打开：

- ◆ *.dsn:此文件为原理图设计文件，请用 Cadence ORCAD 10.5 或以上版本打开。
- ◆ *.pcb: 此文件为版图设计文件，请用 PADS 2005 SP2 或以上版本打开。
- ◆ *.lib: 此文件为 2.4G 天线的 Protel99 格式 PCB 库，用 Protel99SE 或以上版本打开。
- ◆ *.asc:此文件为从*.pcb 文件中导出的网络表，导出格式为 PowerPCB v3.0,可用相关软件版本导入查看，也可用 Protel 99 导入查看，但不建议直接以此为基础进行 PCB 设计，因为从原始文件导出时可能丢失了部分属性。
- ◆ *.zip:此压缩包文件（用 winzip 解压）为从*.pcb 文件中导出的 Gerber 文件，可导入到 CAM350 中查看，没有丢失任何属性。
- ◆ *.pdf:此文件中包括原理图和版图的丝印，可用 Adobe Reader 打开。

7.2. 软件参考文档[3]中对应源码用什么软件打开？

参考文档[3]中提供软件参考方案，包括 SPI 接口操作，编程说明和参考代码介绍，其源代码在 Keil C51 uVision2 环境下编译通过。

7.3. 如何设计 BK2421 的天线？按照参考文档中设计，是否需要重新调试？

2.4G 天线，如果不考虑成本及体积，可以选用其它天线，如贴片天线（小尺寸、中性能、中成本）或外置的鞭状天线（大尺寸、高性能、高成本），而参考文档[2]中主要介绍了 PCB 天线，因为其成本最低、尺寸中等，只要设计得当又能满足大部分应用。

参考文档中包括三种 PCB 天线设计：超小型 PIFA 天线（用于 Nano Dongle，占用 PCB 面积最小，但最大增益会比其它两种天线小 6dB 左右，即工作距离会短一半）；正常 PIFA 天线（用于 Normal Module，占用 PCB 面积最大，最大增益可以达到 1.5dB）；正常 Wiggle 天线（用于较紧凑型 Normal Module，占用 PCB 面积比第二种稍小，增益也稍差 1dB，可以用于对体积稍有要求的无线终端，如对于空间比较紧凑的无线鼠标等设备）。

如果你的设计环境跟参考文档中环境差不多的话，就基本上不用调试了，参考文档中的天线请注意两个板子都为双面 FR4 板材，其中小的 NANO 天线板厚为 0.6mm，大 Normal Module 天线板厚为 1mm,如果板子参数与以上不一致或板子大小和机壳环境差异很大，则 Layout 时需适当加长天线末端长度（如增加 2mm）或直接调试 L4,C10 俩元件供调试天线匹配到 50 欧姆。

7.6. 怎样使 Power down 模式下电流消耗最低？

需要将 BK2421 CSN 置高，CE 置低，如果线上有上拉电阻，CLK 及 MOSI 需置高，如果线上没有上拉电阻，CLK 及 MOSI 需置低。请另外注意 MCU 空闲引脚的处理。

7.7. 怎样控制输出功率？

注意 Bank1_REG4 的默认设置为“0xD99E860B”；控制输出功率由 3 个 bit 组成 RF_PWR[2:0]，其中最高位 RF_PWR[2]位于 Bank1_Reg4[20];其它两位 RF_PWR[1:0]位于 Bank0_Reg6[2:1]，输出功率值如下表所示：

RF_PWR[2] = Bank1_Reg4[20]	RF_PWR[1:0] = Bank0_Reg6[2:1]	输出功率 (dBm)	电流 (mA)
1	11	5	23
1	10	0 (默认值)	17
1	01	-5	15
1	00	-10	13
0	11	-25	12
0	10	-30	11
0	01	-30	11
0	00	-40	11

图表 13 输出功率控制表

7.8. 怎样使接收灵敏度变得更差，以便控制在较短距离内通信？

为了只能在较短距离内通信（如最初的对码），除了控制输出功率到最低以外，还可以控制接收灵敏度，需要设置 Bank0_REG6[0]=0，灵敏度会变差 20dB 左右。

7.9. 如何操作 FEATURE 寄存器 Bank0_REG29 和 Bank0_REG7[7]=RBANK？

在读写这些寄存器前，需要先通过 ACTIVATE(+0x73 或+0x53)命令来激活。用户应该在激活寄存器前先读该寄存器，只有在读出来为 0 的情况下才下激活命令。激活后，再向该寄存器写入应写的值。如果本身是激活的,则下命令以后会变成非激活状态；在非激活状态下，返回值都为 0。

7.10. 多次连续插拔电源，为什么有时会通讯失败？

因为寄存器在短暂掉电后，由于电源上大电容存在电荷，不会彻底放完电，所以寄存器的值掉电后可能还没有丢失，重新上电不会恢复到上电默认值，所以在写 ACTIVATE 命令(+0x73 或+0x53)的时候必须先读取 FEATURE (0x1D) 或 Bank0_REG7[7]=RBANK 的值，如果相关寄存器已被激活，在初始化的时候就不用写 ACTIVATE 命令，否则会将本来已激活的寄存器变为非激活状态。

7.11. 为什么我设置的自动重发次数 ARC 为非 0，系统却没有自动重发？

如果希望 BK2421 出错重发，收发双方都必须将 Bank0_REG1=EN_AA 对应 Pipe 的寄存器使能。比如收发双方使用 Pipe0 通信，则都需要 Bank0_REG1[0]=1。

7.12. EN_DPL 和 EN_AA 各工作状态下的区别？

EN_DPL 和 DPL_Px	EN_AA	说明
0	0	兼容 Nordic 旧芯片,采用旧包格式, 无 Enhanced ShockBurst 模式。
0	1	静态载荷长度由 RX_PW_Px 寄存器确定, 发射端载荷长度与接收端一致。 如要工作在 NOACK 模式, 需 REG1D[0]=EN_DYN_ACK=1, 发 W_TX_PAYLOAD_NOACK 命令。
1	0	动态载荷长度, 用命令 W_TX_PAYLOAD 发送 NOACK 包。
1	1	如要工作在 NOACK 模式, 需 REG1D[0]=EN_DYN_ACK=1, 发 W_TX_PAYLOAD_NOACK 命令。

图表 14 EN_DPL 和 EN_AA 不同工作状态**7.13. 怎样将 MAX_RT 状态位清零？**

芯片在发送一个 ACK 包的时候, 如果重传次数超过 ARC, 就会引起 MAX_RT 中断。

只有 TX FIFO 中没有数据包, 才能彻底清除 MAX_RT 中断。如果 TX FIFO 中有数据包, 在清 MAX_RT 中断后, 系统又开始重传 FIFO 里的最先压入的一个数据包, 直到传输成功或者重传次数再次超过 ARC。

如果想丢弃 TX FIFO 中的数据包, 可以执行 FLUSH TX FIFO 命令, 把 TX FIFO 清空。

故清除 MAX_RT 需要依次执行如下步骤:

- ◆ 将 TX FIFO 清空 (FLUSH TXFIFO);
 - ◆ 清除 MAX_RT 标志位;
- RX_DR 和 TX_DS 中断只要分别向其写 1 就可清除。

8. 参考文档

- [1]. **BK2401/BK2421 Datasheet v2.0**
- [2]. **BK2401_BK2421 Hardware Reference Design v3.0**
- [3]. **BK2401_BK2421 Programming Guide v2.0**
- [4]. **BK2401_BK2421 Demo Board User Guide V2.0**

CONFIDENTIAL